

УДК 539.3

**А.Д. ЧЕПУРНОЙ**, докт. техн. наук, **Г.П. ГЛИНИН**, **Ю.Б. ГУСЕВ**,  
**М.М. ПЕКЛИЧ**, **Е.Н. БАРЧАН**, Головной специализированный  
конструкторско-технологический институт, г. Мариуполь,  
**Н.А. ТКАЧУК**, докт. техн. наук, НТУ “ХПИ”

## **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

В статті запропоновано єдиний метод аналізу та синтезу елементів складних механічних систем на основі взаємопов'язаних етапів розрахунку напружено-деформованого стану та експериментальних досліджень. Розглядаючи процес проектування з точки зору системного підходу, вдається встановити міру відповідності числових та експериментальних результатів, а також ідентифікувати параметри розрахункової моделі досліджуваного елемента.

The united method of analysis and synthesis of elements of the complicated mechanical systems is offered in the paper on the basis of interrelated stages of computation of stressed-deformed state and experimental researches. Examining a planning process from the viewpoint of system approach, it is succeeded to set a measure of accordance of numerical and experimental results, and also to identify the parameters of computational model of explored element.

**Актуальность задачи.** В процессе автоматизированного проектирования сложных машиностроительных конструкций возникают задачи обеспечения достоверности расчетных схем, применяемых для исследования их напряженно-деформированного состояния с привлечением таких современных методов как метод конечных элементов (МКЭ) [1, 2]. Применение расчетных схем в МКЭ требует в качестве исходных данных значения параметров конечно-элементной разбивки исследуемых объектов, граничных условий и нагрузок. Точность исходных данных обеспечивает высокую точность численных результатов. В последующем при использовании данных моделей в специализированных интегрированных системах автоматизированного анализа и синтеза элементов сложных механических систем обеспечивается и точность исследований, и высокие прочностные и жесткостные характеристики проектируемых изделий. В конечном итоге обеспечиваются высокие технические характеристики и конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Существующие в настоящее время численные методы исследования напряженно-деформированного состояния, среди которых лидирующее положение занимает МКЭ, не обеспечивают только за счет внутренних средств контроль точности результатов моделирования по сравнению с поведением реальных объектов. Актуальной становится задача обеспечения

достоверности используемых расчетных схем при численном исследовании сложных машиностроительных систем. В статье на основе некоторых подходов, описанных в [3-5], предлагается расчетно-экспериментальный метод (РЭМ) исследований, при использовании которого в качестве основно-

го результата выступают достоверные и точные расчетные модели исследуемых объектов, получаемые соединением в едином процессе численных и экспериментальных исследований их напряженно-деформированного состояния.

**1. Постановка задачи синтеза расчетных моделей при расчетно-экспериментальном исследовании.** Задачу исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем можно рассмотреть таким образом. Пусть  $\mathbf{R}$  – реальный объект, поведение которого формально описывается при помощи в общем случае неизвестного оператора  $L_R$  :

$$L_R(u_R, P_R, f, t) = 0, \quad (1)$$

где  $u_R, P_R, f, t$  – переменные состояния, параметры, внешняя нагрузка и время соответственно.

Математическую модель  $\mathbf{M}$ , получаемую в результате процесса идеализации  $I$ , описывает известный оператор  $L_M$  :

$$L_M(u_M, P_M, f, t) = 0, \quad (2)$$

где в скобках – переменные состояния, параметры, внешняя нагрузка и время соответственно.

Численную модель  $\mathbf{N}$ , получаемую в результате процесса дискретизации  $D$ , описывает в каждом конкретном случае оператор  $L_N$  :

$$L_N(u_N, P_N, f, t) = 0. \quad (3)$$

Индексы  $N$  в данном выражении соответствуют некоторой создаваемой численной модели исследуемого объекта и явления.

Численная модель подразумевает совокупность собственно дискретизированных уравнений, численных методов их решения, алгоритмов и программного обеспечения.

Если объект или его физическая модель (при физическом моделировании  $\mathbf{F}$ ) подвергаются экспериментальному исследованию, то сам объект или его модель, метод исследований, измерительные схемы (регистрация, усиление, расшифровка, представление) и измерительная аппаратура образуют экспериментальную модель  $\mathbf{E}$ , поведение которой в операторном виде можно записать следующим образом:

$$L_E(u_E, P_E, f, t) = 0. \quad (4)$$

Соотношения (1) – (4) описывают различные формы реального объекта и исследуемого явления (на рис. 1 приведена схема исследования). В схеме на рис. 1 процесс сравнения данных численных и экспериментальных иссле-

дований обозначен через  $C$ .

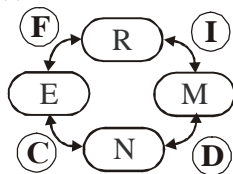


Рис. 1. Общая схема соотношения этапов исследования сложных механических систем:  
 $R$  – реальный объект;  $M$  – математическая модель;  
 $N$  – численная модель;  $E$  – экспериментальная модель;  $F$  – физическое моделирование;  
 $I$  – идеализация;  $D$  – дискретизация;  
 $C$  – сопоставление

Ставится задача разработки математического аппарата для расчетно-экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем в автоматизированном режиме.

**2. Формализация задачи.** При выборе экспериментального метода для расчетно-экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем предпочтение отдается методам, которые позволяют зафиксировать наиболее значимые стороны исследуемого процесса или явления с высокой точностью. Исходя из того, что в процессе идеализации модели и создания ее численной модели вносятся различного вида погрешности, можно обоснованно предположить, что эти погрешности скажутся на соответствии результатов численных расчетов и экспериментальных измерений компонент напряженно-деформированного состояния. В связи с этим выделяются следующие типы задач для *обоснованного* выбора:

- на этапе **D**: *задание параметров дискретизации* (т.е. например, поиск минимально необходимой сетки, описывающей адекватный процесс в математической модели (сгущение и сравнение поведения решения при этом не всегда оправданно, так как применяемые конечные элементы, например, не дают возможности в полной мере описать тот или иной процесс));

- на этапе **I**: *определение значимых параметров* (в случае очень большого количества параметров  $P$  возникает вопрос их минимизации, т.е. поиска необходимого (или оптимального, или рекомендуемого) набора параметров);

- на этапах **I, D**: *степени полноты множества* (существенные параметры в модели могут быть проигнорированы (например: модель строится на основе Shell-элементов, а требуется – Solid; в модели использовано жесткое защемление, а требуется – упругое); отсюда возникает необходимость обоснованного *пополнения* набора параметров модели).

Сведя к минимуму погрешности в цепочке этапа **F** (физическое моделирование и измерение), а также обоснованно допустив возможность добиться структурного и параметрического изменения математической и численной модели таким образом, чтобы обеспечить адекватное описание  $R$ , исходную задачу можно представить в виде определения такой рациональной структуры и множества параметров значений  $P_N$ , чтобы с заданной точностью описать поведение реального объекта:

$$P_N^*, f_N^*: I(u_N - u_E) \leq \varepsilon, \quad (5)$$

где  $I$  – некоторая мера, определяющая несоответствие результатов экспериментальных и численных исследований ( $\Delta u_{NE} = u_N - u_E$ ).

При этом можно выделить следующие типы задач:

- 1) Определение типа численных моделей и (или) характеристик конечно-элементных разбинок;
- 2) Определение величины, структуры, типов и (или) закона распределения нагрузок на элементы механических систем;
- 3) Определение граничных условий и условий сопряжения;
- 4) Определение свойств материалов;
- 5) Определение значимых параметров моделей;
- 6) Определение полноты множества значимых параметров;
- 7) Определение минимального полного множества параметров;
- 8) Определение границ применимости моделей;
- 9) Определение чувствительности моделей к изменению параметров;
- 10) Определение зависимости характеристик модели (например, прочностных и жесткостных) от конструктивных или иных параметров модели во всем или в выделенном диапазоне изменения.

**3. Обобщение исходной постановки при разработке расчетно-экспериментального метода исследований элементов сложных механических систем.** Исходная постановка задачи по сравнению с соотношениями (5) может быть расширена. В частности, возможны следующие обобщения предлагаемого подхода.

*Для классов конструкций или для множеств моделей* при исследовании напряженно-деформированного состояния элементов механических систем во многих случаях возникает проблема оценки достоверности результатов, получаемых при численном моделировании реакции исследуемых систем на различные виды воздействий. Чаще всего эта проблема разрешается сравнением полученных результатов с данными, полученными другим способом (численно, аналитически, экспериментально). Естественно, что данные, полученные в ходе экспериментальных исследований (при соблюдении определенных требований к условиям их проведения, а также характеристикам используемой регистрирующей и измерительной аппаратуры) представляют особый интерес, поскольку при этом могут проявиться такие свойства объекта, которые учитываются исходной математической моделью или не в полной мере, или вообще ею не учитываются. Анализ результатов экспериментальных исследований может также заставить изменить используемые при исследовании численные модели (например, при использовании метода конечных элементов – типы применяемых конечных элементов, их размеры, расположение зон сгущения-разрежения конечно-элементных сеток). Существенными являются и следующие факторы: характер зависимости напряженно-деформированного состояния от времени, степень влияния на него

условий контактного сопряжения, параметров окружающей среды и т.д.

В связи с этим большое развитие в последнее время получили методы исследований прочностных и жесткостных характеристик элементов механических систем, сочетающие численные и экспериментальные этапы. Традиционный подход к расчетно-экспериментальным исследованиям (рис. 2) направленный на исследование конкретного объекта, параметра, эффекта, предполагает сопоставление результатов исследований “по горизонтали”, т.е. полученных для одного объекта каким-либо из численных методов (или несколькими) и каким-либо из экспериментальных методов (или несколькими).

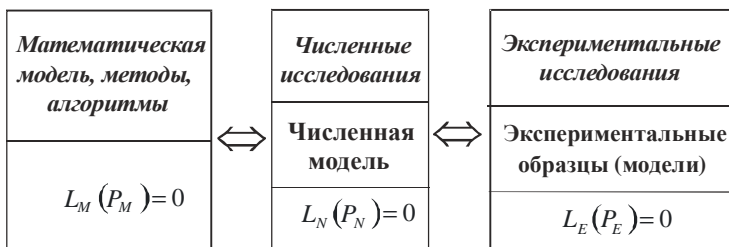


Рис. 2. Традиционная схема расчетно-экспериментальных исследований

Данный подход эффективен во многих случаях, когда поведение исследуемого объекта достаточно полно описывается одним или небольшим количеством определяющих параметров. Однако при исследовании реальных механических систем в большинстве случаев имеет место ситуация, когда в исследуемом объекте нельзя заранее выделить эти определяющие параметры. Машина или механизм, состоящие из единиц, десятков и сотен основных элементов, находящихся в десятках, сотнях и тысячах взаимосвязей между собой и с внешней средой, описываются достаточно сложной математической моделью.

При использовании традиционной схемы происходит сопоставление как параметров  $P_M$ ,  $P_N$ ,  $P_E$ , так и зависимостей между ними, описываемых  $L_M$ ,  $L_N$ ,  $L_E$ , и последующая корректировка моделей до получения удовлетворительного соответствия. Одновременно может производиться как обособленное расширение, так и сужение набора определяющих параметров, усложнение или упрощение зависимостей между ними.

Предлагается новая схема организации исследований, в которой можно устанавливать взаимосвязь не только между параметрами  $P_M$ ,  $P_N$ ,  $P_E$  и операторами  $L_M$ ,  $L_N$ ,  $L_E$ , а и между множествами тех и других (рис. 3). Это позволяет использовать при организации баз данных, содержащих результаты численных и экспериментальных исследований, описывающих различные механические системы, проводимые в различное время различными исследователями с применением различной аппаратуры, различных численных мето-

дов, различных вычислительных методов и средств для установления иско-  
мых зависимостей. Более того, избыточность информации (которая имеет  
место в некоторых случаях) на самом деле не приводит к противоречиям, а  
служит дополнительным источником повышения достоверности результатов,  
степени адекватности моделей и точности методов. Причем сопоставление  
результатов можно производить как между элементами множеств **М**, **Н** и **Е**  
(математические модели, результаты численных и экспериментальных ис-  
следований соответственно), так и внутри множеств, используя при этом раз-  
личные весовые коэффициенты для выделения результатов более значимых  
исследований.

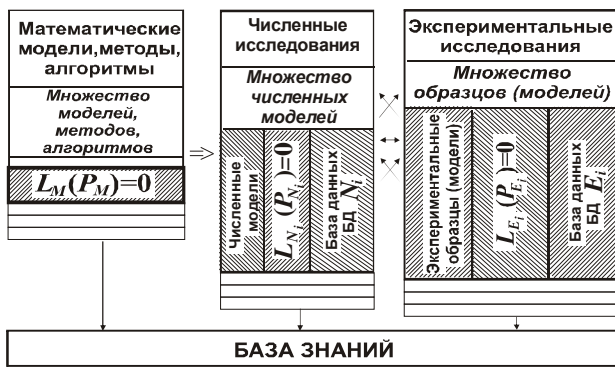


Рис. 3. Предлагаемая схема расчетно-экспериментальных исследований

Получаемая в результате база знаний за счет постоянного пополнения  
множеств **М**, **Н** и **Е** не только растет в объеме, но и повышает достоверность  
содержащихся в ней элементов знаний.

Естественно, что предложенная схема нуждается в определенной фор-  
мализации. Отдельной крупной задачей является организация, создание и  
сопровождение баз данных хотя бы по отдельным классам объектов, по тем  
или иным областям. Кроме этого, еще одной важной проблемой является вы-  
бор критериев сопоставимости различных элементов различных множеств.  
Более того, в большом количестве случаев могут выявиться противоречия  
между сопоставляемыми данными, причем они могут на первый взгляд про-  
сто взаимно исключать друг друга. Однако такое состояние предлагаемой  
схемы соответствует в общих чертах состоянию знаний во многих отраслях  
науки и техники. Это нормальный процесс установления новых, уточнения и  
опровержения старых представлений о поведении объекта (машин, узлов,  
механизмов, агрегатов и т.д.). В практике проектировщиков нередки случаи,  
когда конструкторы, исследователи с большим опытом работы по памяти  
устанавливают аналогии между элементами нового проекта, находящегося в  
разработке, с элементами своих или чужих проектов, выполненных гораздо  
раньше. Это находит в последующем подтверждение при сопоставлении мо-

делей и результатов. Таким образом, предлагаемый подход является в некоторой степени схемой, действующей в практике проектирования: накопление данных, выявление аналогий и установление зависимостей.

Естественно, что данный подход требует особой организации соответствующих баз данных, поскольку количество учитываемых факторов, параметров, воздействий и взаимосвязей в механических системах чрезвычайно велико, даже если ограничиться отдельным классом объектов. Лавинообразного роста информации можно избежать, используя иерархические структуры ее хранения, основанные на различных типах классификаций исследуемых объектов: по форме, по составу, по типам внешних воздействий, по функциональному назначению и т.д. При этом можно устанавливать различные виды соответствия: внутри определенного класса, подкласса, подподкласса, а также между элементами разных классов, подклассов, подподклассов и т.д.

Формализация предложенного подхода может быть следующей. Пусть множество  $R$  – объединение элементов  $\bar{R}^i$ . Тогда множество параметров  $\bar{P} = \bigcup P_i$ , т.е. множество параметров  $\bar{P}$  является объединением множеств отдельных параметров отдельных представителей класса (для каждой из типов моделей  $R, N, M, E$ ), и задача (5) записывается в виде:

$$\bar{P}_N^* : I(\bar{P}, \bar{P}_N, \Delta u_{NE}) \leq \varepsilon. \quad (6)$$

*Для расширенного множества параметров*, исходя из идеи о формальной равноправности параметров  $P_E, P_N, P_M$ , можно формировать *расширенное обобщенное параметрическое пространство*, из которого можно выделять подпространства *варьируемых параметров, уточняемых параметров, критериальных параметров, ограничительных параметров*. При этом в процессе исследований все эти категории могут быть пересекающимися, перетекующими друг в друга. Тогда задача (5) записывается в виде:

$$\bar{P}_V^* : I(\bar{P}, \bar{P}_V, \Delta u_{NE}) \leq \varepsilon, \quad (7)$$

где  $\bar{P}_V$  - множество варьируемых параметров.

*На случай динамического процесса* обобщение задачи на динамический процесс

$$P_N^*, f^* : I(t) \leq \varepsilon \quad (8)$$

предполагает формирование критерия, позволяющего распространить функционал на некоторый характерный интервал времени.

*На случай нелинейного процесса* справедлива формулировка

$$P_N^*, \tau^* : I(\tau) \leq \varepsilon, \quad (9)$$



где  $\tau$  – множество параметров, описывающих нелинейный процесс (например, параметры нагружения при упруго-пластическом деформировании).

**На случай резко возрастающих требований к вычислительным ресурсам** возникает проблема, если требование увеличения точности вступает в противоречие с существующими в распоряжении исследователя вычислительными ресурсами  $R_s$  (выступает в качестве штрафа: величина его резко возрастает при приближении к ограничению на имеющиеся ресурсы):

$$P_N^*, f^*: I(P_N, f) + R_s(P_N, f) \leq \varepsilon. \quad (10)$$

**На случай сравнения состояний объекта через большие промежутки времени** можно использовать идею *хронологического “портретирования”* (т.е. серия “снимков” объекта через большие промежутки времени, а отсюда – определение или изменения самого объекта, или физико-механических характеристик материала). Происходит как бы “привязка” “ромба” (см. рис. 1) предлагаемого РЭМ к разделенным моментам времени. В данном случае

$$P_N^*, f^*: I(t_1, t_2, \dots, t_n) \leq \varepsilon, \quad (11)$$

где  $t_1, t_2, \dots, t_n$  – моменты времени, при которых производится сравнение состояний объекта.

**Для интенсификации процесса расчетно-экспериментальных исследований** при построении расчетных моделей элементов современных машиностроительных конструкций необходимо использовать сбалансированные расчетные модели, которые характеризуются следующими особенностями: учетом всех значимых факторов; отсутствием избыточности; прогнозом чувствительности модели к изменению различных параметров.

Поскольку современные изделия характеризуются сложностью конструкции, а также условий нагружения и сопряжения его элементов, и при этом широким разнообразием вариантов исполнения и эксплуатационных режимов, то удовлетворение требований к точности, надежности и минимальной материалоемкости предполагает проведение комплекса их экспериментальных и теоретических исследований. По традиционной схеме исследований на это требуется значительное время, что сдерживает сроки проектирования и технологической подготовки производства. Предлагается интенсивная схема исследований (ИСИ) элементов сложных механических систем, включающая следующие этапы:

- проведение анализа целого класса конструкций;
- определение типовой для той или иной группы конструкций;
- проведение исследований выбранной конструкции с варьированием всех факторов;
- построение ряда расчетных моделей после анализа результатов исследования типовой конструкции.

При обоснованном использовании данного подхода получается многократная экономия времени, средств, ресурсов оборудования без ущерба для достоверности.

***Для формирования баз данных, знаний и экспертных систем на основе расчетно-экспериментальных исследований*** во многих случаях самостоятельную ценность имеют не только и не столько экспериментально проверенные результаты численных исследований, но и рационально сбалансированная достоверная численная модель объекта.

Конечно-элементная модель сложного объекта может иметь также и большую коммерческую ценность. Кроме того, предложенная методика может быть положена в основу иерархической базы данных и знаний о том или ином классе объектов, причем объектами сравнения могут быть множества баз данных (как численных, так и экспериментальных). Здесь также могут быть введены соответствующие критерии улучшения модели, причем для сравнения могут быть взяты модели, полученные независимо из различных источников и в разное время.

Окончательным результатом исследования является достоверная численная модель для определения напряженно-деформированного состояния тех или иных объектов или классов объектов.

При решении поставленной задачи при помощи предложенного расчетно-экспериментального метода ее можно обратить: пусть имеется достаточно точный инструмент исследования численных моделей, однако существует сомнение в применимости тех или иных математических моделей. То же – на любом участке цепи “математическая модель – численная модель – экспериментальная модель с измерительной аппаратурой”. В этом случае можно: определить структуру и параметры той или иной модели (*узкая задача*); определить в пространстве варьируемых параметров области, в пределах которых справедливы различные модели (*широкая задача*).

Формально в процессе исследований можно “уравнять в правах” все типы моделей, выделив группу уточняющих моделей и уточняемую модель. Кроме того, возможна и постановка “смешанной” задачи, т.е. задачи, в которой объектом уточнения является множество параметров, представляющее совокупность параметров из различных типов моделей. В этом случае вместо уточняющих и уточняемых моделей (и их параметров) в качестве основных объектов выступают соответственно подмножества параметров. Более того, состав этих множеств может изменяться за счет “миграции” параметров из группы в группу.

Предлагаемый метод изучения напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем допускает глубокую степень формализации, однако большую роль в процессе исследований играет сам исследователь (или группа исследователей). В его компетенции – определение, изменение (удаление, пополнение) множества параметров, а также границ их изменения, разрешение коллизий, а также текущий контроль над процессом. Это обусловлено, во-первых, невозможностью на данном этапе пол-

ной формализации предлагаемой технологии исследований, во-вторых, необходимостью исключения тупиковых ситуаций и, в-третьих, очень высокой стоимостью ошибки (например, неоправданное усложнение плана экспериментальных исследований может повлечь такой рост общей стоимости всего комплекса исследований группы или класса конструкций, что он превысит стоимость аналогичных работ по традиционному способу).

Предложенные схемы расчетно-экспериментальных исследований позволяют оперативно проводить *серии* исследований групп конструкций, причем наиболее трудоемкая часть, а именно экспериментальная, проводится в минимально возможном объеме.

Используя преимущества INTERNET-технологий, исследования с применением предложенного расчетно-экспериментального метода можно, во-первых, распараллелить (т.е. одновременно выполнять отдельные этапы и подэтапы силами различных исследователей и исследовательских групп), а, во-вторых, разнести географически и хронологически. При организации сервера баз данных возможна также определенная организация хранения результатов исследований, позволяющая создавать банки данных по тем или иным группам конструкций. Придавая таким базам данных свойства открытости и доступности, на определенной стадии их развития можно создавать “верификационные эталоны” для различных видов механических систем. Это в свою очередь позволяет создавать экспертные системы, само существование которых избавило бы от необходимости проводить большую часть экспериментальных исследований, поскольку перед предстоящим циклом исследований всегда была бы возможность обратиться к соответствующей (и все время пополняемой) базе знаний. Чем полнее и совершеннее эта база, тем больше вероятность получить необходимые рекомендации для построения достоверной численной модели исследуемой механической системы.

Естественно, что при проведении расчетно-экспериментальных исследований в предложенной постановке одним из требований является некоторая степень *избыточности* экспериментальных данных, которая позволяет повысить степень точности и полноты создаваемой численной модели.

Таким образом, предложенный подход позволяет устранить существующие недостатки традиционной технологии расчетных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем, а именно формализовать процесс сравнения, автоматизировать процесс улучшения численной модели и повысить оперативность всего цикла исследований с привлечением современных информационных технологий, что дает возможность провести географическое и временное разделение процесса исследований.

**Многошаговое уточнение параметров расчетных моделей элементов механических систем.** Процесс исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов современных машиностроительных конструкций характеризуется следующими особенностями: быстрая сменяемость изделий; предельно сжатые сроки проектирования и необхо-

димость дальнейшего уменьшения сроков, отведенных для расчетов и испытаний изделий, подготовки производства, а также необходимость снижения стоимости данных этапов; высокие требования к техническим характеристикам изделий и к экологической безопасности их эксплуатации; наличие достаточного числа мощных универсальных CAD/CAM/CAE-систем, которые автоматизируют большую часть этапов конструирования, исследований и технологической подготовки производства; высокая стоимость и большая длительность экспериментальных исследований; сложность формы, а также условий эксплуатации проектируемых машин; наличие большого количества разъемных и неразъемных соединений; необходимость учета явлений предварительного натяга, наличия микрозазоров, остаточных напряжений, односторонних ограничений в зонах контакта; неоднородность, анизотропность материала; уникальность некоторых объектов и недостаток в этой связи данных по исследованиям аналогичных конструкций.

Указанные обстоятельства предполагают необходимость во многих случаях производить в сжатые сроки и теоретических, и экспериментальных исследований элементов вновь проектируемых машин. Целый ряд конструкций при этом естественным образом вписывается в интенсивную схему расчетно-экспериментальных исследований. Однако дальнейшее ужесточение требований к достоверности результатов исследований требует создания расчетно-экспериментальных методов исследований, которые позволяют учитывать индивидуальные особенности исследуемых конструкций. Это возможно только в том случае, когда процессы теоретических и экспериментальных исследований: параллельны во времени; взаимосвязаны по данным; взаимно интегрированы; согласованы по используемым подходам; взаимно корректируемые по моделям.

Предлагается многошаговая схема расчетно-экспериментальных исследований элементов механических систем, которая предполагает следующие этапы.

1. Создание пробной расчетной модели объекта (*модель первого уровня*) с использованием специализированной или универсальной системы автоматизированного проектирования
2. Проведение численного исследования объекта
3. Проведение экспериментального исследования объекта. Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований и определение значимых факторов модели
4. Корректировка структуры и параметров расчетных моделей объекта (*модель второго уровня*)
5. Проведение повторного численного исследования объекта
6. Корректировка расчетной *модели третьего уровня*
7. Проведение численных исследований объекта с различным набором конструктивных и эксплуатационных параметров. Расчет значений параметров, обеспечивающие необходимый уровень прочности, жесткости, вибраций и т.д.

## 8. Корректировка исходной модели в САПР.

Одна из основных идей метода заключается в создании единой базы данных, в которую записываются в согласованной форме результаты численных и экспериментальных исследований, проводимых параллельно. Полученные расчетным и экспериментальным путем распределения искомых величин должны быть численно сопоставлены. В качестве критериев соответствия в некоторых случаях предлагается вычисление коэффициентов

$$k_B = \frac{\|u_E\|}{\|u_N\|}; \quad k_\phi = \frac{\|u_E - k_B u_N\|}{\|u_E\|}, \quad (12)$$

где  $u_E$ ,  $u_N$  – поля измеряемых величин (перемещения, напряжения, деформации), полученные соответственно экспериментальным и численным путями;

$\|\cdot\|$  – некоторая норма;

$k_B, k_\phi$  – коэффициенты соответствия величин и форм распределения.

Первый из коэффициентов описывает для многих случаев степень несоответствия характеристик материала (могут не соответствовать принятые расчетные и реальные для материала модели или самого объекта), применяемых гипотез (несоответствие расчетных и фактических моментов раскрытия стыков, величин предварительных натягов, а также дефекты материала или дефекты технологической операции), параметров конечно-элементной модели (неудачный выбор типов применяемых элементов, вида и густоты конечно-элементной сетки) и т.д. При этом необходимо заранее определять предельно допустимое значение  $k_B$  (в идеальном случае  $k_B=1$ , и чем больше он отличается от 1, тем хуже соответствие). Коэффициент  $k_\phi$  в идеальном случае равен 0, а причины отклонения от идеального случая – те же, что и для  $k_B$ . Отличительной особенностью данного коэффициента является то, что в некоторых случаях он не может быть уменьшен ниже некоторой предельной величины  $k_\phi^{np}$  вследствие того, что расчетная модель несет в себе неустранимые погрешности. В этом случае (если порог  $k_\phi^{np}$  неприемлемо высок) необходимо производить корректировку исходной расчетной модели.

Область применения предложенного метода охватывает самые широкие классы исследуемых конструкций, виды решаемых задач и типы анализируемых процессов.

С учетом ограничений на варьируемые параметры  $P$  в реальных ситуациях, в предположении адекватной математической модели, минимизации различного вида погрешностей (измерения, округления, расшифровки), ос-

новную идею предполагаемого расчетно-экспериментального метода можно представить в виде задачи:

$$P_N^* : I(P_N) \rightarrow \min \text{ на } S_{PN}, \quad (13)$$

где  $S_{PN}$  – область варьирования  $P_N$ .

Возможные варианты решения задачи:

1.  $I(P_N^*) \leq \varepsilon$  – полученная расчетная модель признается удовлетворяющей критерию точности (рис. 4, а), а множество параметров – требованию полноты.

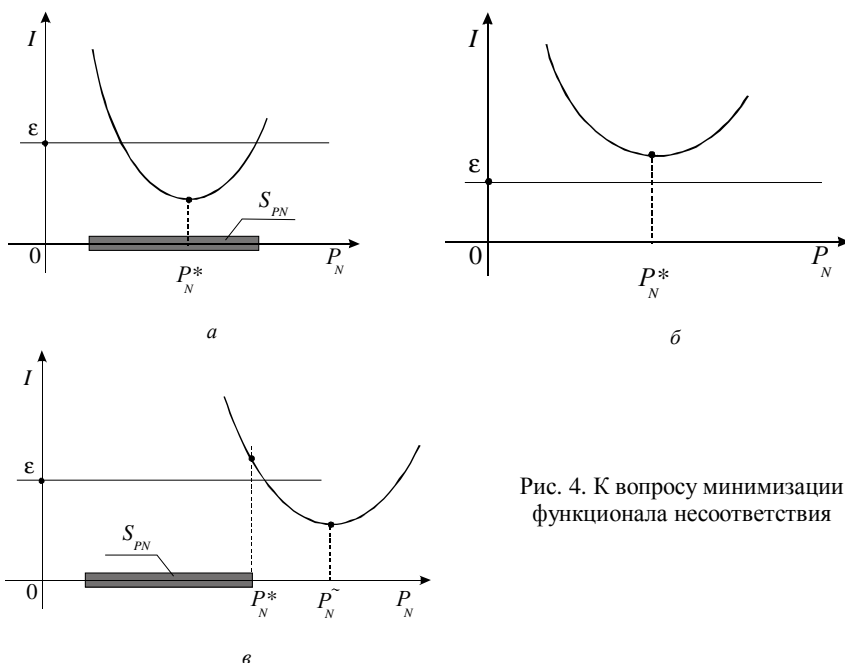


Рис. 4. К вопросу минимизации функционала несоответствия

2.  $I(P_N^*) \geq \varepsilon$ , и не существует в пространстве параметров  $P_N$  такой точки, что  $I(P) \leq \varepsilon$ . Тогда пространство параметров неполное, и необходимо добавлять параметры в структуру модели (рис. 4, б).

3.  $I(P_N^*) \geq \varepsilon$ , но существует в пространстве параметров  $P_N$  точка или область, где  $I(P) \leq \varepsilon$ . Отсюда – вывод о некорректных ограничениях на параметры модели (или достоверная модель лежит за пределами возможностей варьирования параметров, например, размерность задачи очень высокая) (рис. 4, в).

4. **Общая схема построения программно-аппаратного комплекса при реализации расчетно-экспериментального метода.** Основное противоречие в процессе исследований по традиционной схеме – отсутствие *взаи-*

мовления результатов теоретических и экспериментальных исследований в процессе самих исследований непосредственно, причем на базе *текущих* результатов исследований.

Основной функциональной особенностью предлагаемого подхода является механизм *обратной связи* в цепи расчет – эксперимент, обеспечивающей *параллельное* и *взаимосогласованное* (и *взаимовлияющее*) изменение плана расчетно-экспериментальных исследований в ходе *самокорректирующего* процесса.

При этом сформулированная в работе задача решается при *скользящем* изменении состава пространств значимых параметров. Результатом работы процесса (рис. 5) является достоверная конечно-элементная модель, обеспечивающая получение прочностных и жесткостных характеристик класса исследуемых конструкций с заданной точностью.

Предложенный расчетно-экспериментальный метод дает возможность создавать *самокорректирующийся* процесс уточнения параметров расчетной параметрической модели.

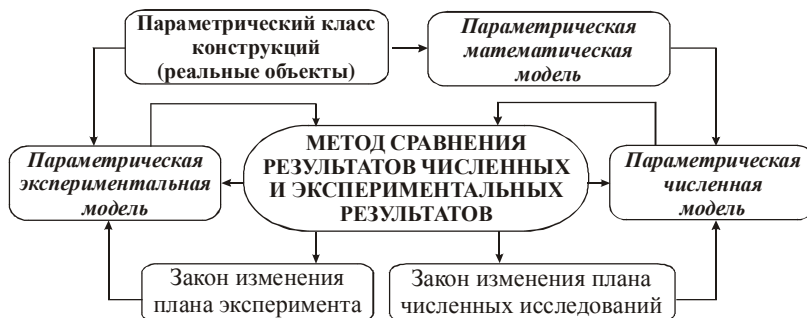


Рис. 5. Структурная схема системы автоматизированного расчетно-экспериментального исследования

**Заключение.** Предложена общая технология расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем, для которой характерны следующие особенности.

1. Предложенный расчетно-экспериментальный метод дает возможность организовывать самокорректирующийся процесс расчетно-экспериментальных исследований, основным результатом которого является достоверная расчетная параметрическая модель исследуемого объекта.

2. Общая постановка и схема построения программно-аппаратного комплекса (ПАК) на базе расчетно-экспериментального метода и специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза предполагает в своей реализации решение следующих задач:

- определение структуры ПАК;
- организация информационных потоков;
- разработку конкретной структуры программно-аппаратного реализа-

ции предложенных подходов;

- численную реализацию прочих подходов

3. Предложенный расчетно-экспериментальный метод устраняет противоречие, следующее из линейного характера процесса исследований в традиционной их постановке.

4. Разработанная технология расчетно-экспериментальных исследований встраивается в цикл проектирования, исследования, технологической подготовки производства и изготовления сложных машиностроительных конструкций.

6. Предложена схема определения значимых факторов расчетных моделей элементов сложных механических систем по результатам экспериментальных исследований.

По результатам опыта использования предложенного метода в условиях исследования реальных конструкций можно заключить:

1. Метод обеспечивает высокую эффективность, оперативность, достоверность, точность и низкую стоимость исследований.

2. Результатом применения метода (или его частичной схемы) могут быть или согласованные распределения искомых перемещений, напряжений, деформаций, или согласованная расчетная модель, готовая для проведения дальнейших численных исследований.

3. Класс конструкций и явлений, на которые может быть распространен предложенный метод исследований, достаточно широк, а сам метод достаточно гибок и легко модифицируем.

Это дает основание утверждать, что применение предложенного подхода приводит к многократному сокращению сроков, стоимости исследований, дает сбалансированную модель для анализа и оптимизации проектируемых конструкций.

В дальнейшем разработанный подход предлагается реализовать в виде специализированного программно-аппаратного комплекса (ПАК), что предполагает в своей реализации решение следующих задач: определение структуры ПАК, разработку конкретной структуры программно-аппаратной реализации предложенных подходов и их материальную реализацию.

**Список литературы:** 1. *Зенкевич О.К.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с. 2. *Стренг Э., Фикс Дж.* Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977. – 349 с. 3. *Капустин А.А., Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ – 1999. – вып.53. – С.148-155. 4. *Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д., Орлов Е.А.* Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения // Механіка та машинобудування. – 2005. – № 1. – С.184-194. 5. *Ткачук Н.А.* Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем // Сб. научн. тр. “Динамика и прочность машин”. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – вып.56. – С.175-181.

*Поступила в редколлегию 19.11.2005*